

基于 USB 的卫星通用化地面测试软件的设计

安然, 任家峪, 张卓, 闵康磊, 罗铿

(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘要: 针对当前卫星地面测试设备研制任务剧增、研制需求周期短、密度大、技术更新快的问题, 将软件工程中的组件技术引入卫星测试软件领域, 提出利用测试功能组件构建通用化测试软件的设计思路; 首先, 对现有卫星型号的地面测试任务做共性研究; 然后, 分析研究现有卫星数传分系统和测控分系统单机地面测试涵盖的所有测试功能, 描述通用化测试软件的研制需求; 以通用化和模块化的设计思路进行软件概要设计; 通过分析软件组成、设计流程图、搭建软件界面等步骤进行软件详细设计; 最后, 软件实现; 提出的基于 USB 接口的卫星通用化地面测试软件, 通过某型号功放级地面测试和某型号 Ka 应答机地面测试, 经验证, 通用性强, 覆盖功能全面, 能较好地满足多个分系统单机设备的测试要求。

关键词: 卫星地面测试; 软件开发; 软件需求分析; 通用化设计; 模块化设计

Design of Generalized Software Based on USB for Satellite Ground Test

An Ran, Ren Jiayu, Zhang Zhuo, Min Kanglei, Luo Keng

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Regarding to large develop task, short demand cycle, high density and rapid technical update in current satellite ground test equipment field, component technology in software engineering was introduced into satellite ground test in this paper. The design idea is using test functional components to construct generalized software. Firstly, the common parts of existing satellite models ground testing task were researched. Secondly, Analysis and research all test function in current satellite test system, then describe the requirement of generalized test software. Generalized and modular ideas were realized in software summary design. And the detail design include software components analysis, work flowchart design, GUI setup. At last, generalized software was realized. The generalized software based on USB for satellite ground test proposed in this paper was verified that it have strong commonality and can cover most test function, it meet the test demand of multiple equipments better in satellite system.

Keywords: satellite ground test; software development; software requirement analysis; generalized design; modular design

0 引言

近年来, 随着航天技术的不断发展与应用, 卫星研制的任务量与日俱增, 多条型号线并行开展。在卫星发射任务日趋密集, 并且保质量保成功的现状下, 卫星用地面测试设备面临严峻的考验。原先以型号为导向, 专研专用的测试设备研制模式, 研发周期长, 排查故障难, 已不能满足当前研制周期短、密度大、技术更新快的需求。因此, 更新研制技术、提高研制效率成为突破问题的关键。

原先的卫星地面测试软件是针对型号专用测试设备配套研制的, 只为实现特定的测试功能, 代码复杂并且难以维护, 不具有扩展性, 在研制阶段没有考虑软件的通用性和复用性。测试需求稍有改动, 便需要软件的代码更改, 有时甚至需要软件构架的更改, 在代码更改后, 需要大量的时间和人员来保证新的代码能够正常工作, 难以保证系统的可靠性、可维护性。

为了解决上述问题, 本文将软件工程中的组件技术引入卫星测试领域, 提出了利用测试功能组件构建通用化测试软件的设计思路^[1]。首先, 本文对现有卫星型号的地面测试软件进行分析, 总结不同测试功能的共性; 其次, 提炼通用化测试软件的研制需求; 然后, 根据组件技术的思路, 进行软件概要设计和详细设计; 最后, 软件实现。目前, 本文提出的基于 USB 接口的卫星通用化地面测试软件已经在多个型号的数传子系统

发射机前级测试、功放级测试, 测控子系统应答机测试上应用, 并证明通用性强, 能较好的满足测试要求。

1 通用化测试系统的构建

本文从系统体系结构模型研究出发, 分析研究通用化测试软件的关键技术, 结合卫星测试的实际功能需求, 给出一种典型的通用化测试系统设计, 并通过试验验证了该系统的实际性能^[2-4]。

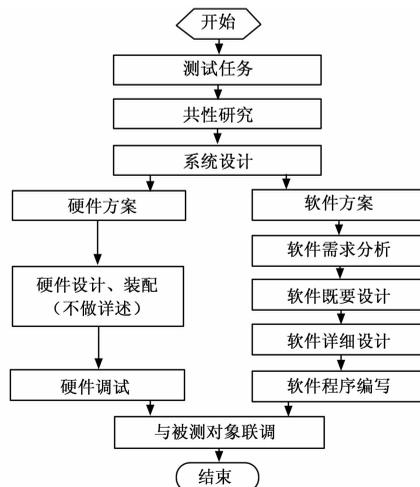


图1 通用化测试系统开发流程图

通用化测试系统的开发流程如图1所示。首先, 对现有卫星型号的地面测试任务总结并统计归类, 进行共性研究, 总结当前测试任务的类型和特点, 完成系统的总体设计。通用化测

收稿日期:2017-08-27; 修回日期:2017-10-25。

作者简介:安然(1989-),女,山东单县人,硕士研究生,工程师,主要从事卫星地面测试软件开发方向的研究。

试系统搭建的关键之一是测试任务的共性研究,通用测试系统要满足多个型号测试任务的要求,那么从众多的测试任务中提炼出共性的测试项目是实现通用测试平台第一个技术关键,其成果直接影响到通用测试系统组建的繁简程度和设计合理性^[5]。在硬件方面,搭载现有的硬件平台,采用已有的成熟的硬件设计方案;在软件方面,进行全新的软件方案设计,软件方案设计要以实现通用化的测试需求为首要目标,按照步骤分为需求分析、概要设计、详细设计和程序编写几个部分。最后,进行系统测试^[6-7]。

基于 USB 接口的通用化测试系统硬件关系如图 2 所示。地面测试台与计算机通过 USB 线相连,在计算机上布置测试软件,地面测试台通过电缆与单机设备连接。地面测试台搭载上位机测试软件实现对单机设备的测试。



图 2 测试系统硬件关系图

具体的测试流程为:在计算机上运行测试软件,测试软件的上位机应用程序提供一个友好的人机交互界面。测试软件通过 USB 接口与地面测试台进行通讯,地面测试台通过电缆与单机设备通信。硬件设备上电后,通过对测试软件的操作完成单机设备和地面测试台等方面的性能指标测试以及相应的数据处理、显示记录等功能。

2 软件需求分析和概要设计

2.1 软件需求分析

软件需求分析主要包括软件的功能需求,非功能需求和设计约束。软件的功能需求是需求规格说明中的主要部分。本章主要对通用化测试软件的功能需求详细阐述。

根据工作经验,就接触的多个卫星型号单机产品,其配套地面测试台的测试功能和任务多有相似之处。经过总结,本文整理出通用化测试软件的软件功能需求。通用化测试软件的目标是尽可能涵盖地面测试台所涉及的所有测试功能,测试者可以通过编写配置文件自行选择实现其中几个或者全部功能,进行测试任务。

卫星型号单机设备地面测试时,地面测试台模拟星上系统实现与单机设备进行数据通信等功能,如接收单机设备的上行数据、模拟星上系统发送下行数据或遥控指令等^[8]。地面测试台模拟星上有效载荷数据、信息处理器输出数据和固态记录器输出数据等,用于卫星与地面测试系统对接试验,卫星数传子系统相关设备的调试、验证。地面测试台接收卫星测控子系统相关单机设备的遥测数据,按位解析,用于卫星测控子系统相关设备的调试、验证。

2.2 软件概要设计

2.2.1 通用化设计

通用化能保证测控系统应用可以独立于不同硬件平台并且具有很好的扩展性^[9],为此,应用软件采用分层设计,在软件和硬件之间定义统一的接口层函数,建立硬件抽象层,使硬件驱动和软件应用层之间保持映射关系,隐藏特定硬件的具体特性和接口细节。硬件资源为上层应用程序提供统一的功能,通过标准的内部接口,将硬件驱动和应用层建立连接关系。分层的设计可以更好的实现软件的移植,上层应用更多侧重的是具体的测试方法和程序。

在应用层,本软件采用建立统一的配置数据库方法来实现不同的测试功能,不同的数据库对应不同的测试应用,用户可以修改数据库的内容来配置具体的程序参数和程序界面。应用层通过配置数据库的信息来建立相关的测试项目的模型和生成图形化界面。采用数据库配置可以更容易的实现测试项目的扩展,当用户需要一种新的测试功能的需求,只需要增加新数据库的结构和语言描述,应用层建立相应的连接关系,从而很快的实现新的测试功能。

2.2.2 模块化设计

根据软件的功能需求分析,我们把软件划分为几个主要模块设计,为确保软件的安全性和可靠性,各模块之间互相独立,结构框架如图 3 示。本软件为实时系统,其设计需要考虑系统的响应时间和数据吞吐量,考虑各任务的优先级,按任务优先级准则执行任务。

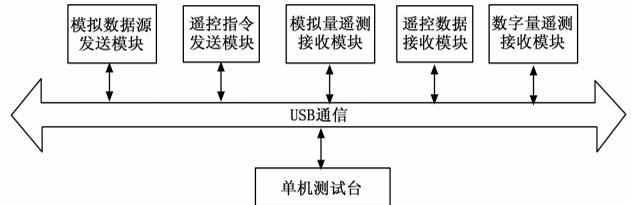


图 3 软件模块化设计框图

本软件主要包括模拟数据源发送模块,遥控指令发送模块,模拟量遥测接收模块,遥控数据接收模块和数字量遥测接收模块。而对于某些大数据量的数据采集和处理需求,考虑到测试的实时性,软件还应增加事后处理模块的设计。当测试数据传输速度快且数据帧格式复杂时,通过界面配置,在数据采集时只做存盘操作,然后在事后处理模块进行数据的组帧、对比、解析等。

1) 模拟数据源发送模块:按照测试需求,软件模拟多路数据源的发送。常见的数据源有三种,第一种是伪随机码或 PN 码;第二种是根据测试要求的帧格式按位组帧,数据帧内容由测试者填写,软件做帧格式正确性判断;第三种是已知的数据文件。模拟数据源的配置还包括发送通道数和指令代码。模拟源发送可选择发送模式,单次发送或者周期发送。软件通过数据库配置和界面配置,模拟不同的数据源发送。

2) 遥控指令发送模块:按照测试需求,软件配置多条遥控指令并发送。遥控指令的配置包括指令内容编辑,指令个数,指令分组,指令代码等。指令发送可选择不同的模式,如单次发送、周期发送、按组发送或顺序发送等。软件可以通过数据库配置遥控指令的内容,也可以通过界面新增、修改或删除指令。指令配置完成后,通过界面加载完成指令的发送。

3) 模拟量遥测接收模块:按照测试需求,软件接收模拟量遥测并解析。模拟量遥测解析是指把接收到的数据按照解析公式转换成电压、电流、温度等模拟量。模拟量遥测接收通道数可配置,遥测参数解析公式、参数个数和曲线监控可配置。软件实现模拟量遥测的实时接收,遥测解析实时或事后可选择,测试数据本地存盘,存盘路径可设置。

4) 遥控数据接收模块:按照测试需求,软件接收遥控数据并处理。遥控数据的处理包括数据比对,计算帧计数并做连续性判读、统计错误消息和误码率等信息。软件实现遥控数据的实时接收,数据实时或事后处理可选择,测试数据本地存盘,存盘路径可设置。

5) 数字量遥测接收模块: 按照测试需求, 软件接收数字量遥测并解析。数字量遥测解析是指把接收到的数据按照解析定义按位解析, 显示成特定含义或控制指示灯的亮与灭。数字量遥测接收通道数可配置, 遥测参数解析定义、参数个数可配置。软件实现数字量遥测的实时接收, 遥测解析实时或事后可选择, 测试数据本地存盘。

3 软件详细设计与实现

3.1 软件组成

基于 USB 通讯的软件主要包括三部分: USB 固件程序、USB 设备驱动程序以及 PC 机应用程序。

3.1.1 USB 固件程序

USB 接口广泛应用于各种外设与 PC 或嵌入式系统的通信, 在各行各业发挥着巨大的作用。如今已经成为最常见的数字接口。USB 功能主要由 USB 接口芯片来实现, 主要实现 USB 控制器的配置、初始化, 控制 USB 芯片和 PC 机、FPGA 之间的数据传输,

固件开发采用的软件是 Keil uVision2 集成开发环境, 采用 C51 语言编写, C51 语言具有 C 语言结构清晰的优点, 便于学习, 同时具有汇编语言的硬件操作能力, 可移植性好, 并且具有丰富的库函数, 提供多种模块化功能, 可降低开发难度、提高开发效率。

3.1.2 设备驱动程序

USB 驱动程序属于标准 WDM 驱动程序。WDM 采用分层驱动程序模型, 分为 USB 总线驱动程序和 USB 功能驱动程序两个部分。其中, USB 总线驱动程序由操作系统提供, 负责与硬件对话, 实现底层通信; 而 USB 功能驱动程序由软件开发人员设计, 位于 USB 总线驱动程序之上, 不直接与硬件对话。USB 功能驱动程序通过 USB 总线驱动程序创建 URB (USB 请求块) 并发送 IRP (I/O 请求包) 来实现与 USB 设备的通信^[10]。

3.1.3 应用程序

应用程序包括实现软件测试功能的实现和搭建软件界面。软件的测试功能按照模块化设计, 在下一小节详细阐述设计流程。软件界面是人机交互的窗口, 通过对软件窗口的操作完成单机设备和地面测试台的数据通信和测试功能, 并在测试工程中实时显示测试结果, 对有需求的测试任务可以提供测试报告的功能。

综合考虑多方面因素, 本软件应用程序采用 Microsoft Visual Studio 2010 开发环境, 采用 C# 编程语言。Microsoft Visual Studio 2010 是目前最流行的 Windows 平台应用程序开发环境, 其优势在于, 一是开发工具在功能上更强大, 二是同操作系统和其他应用软件配合上更加完善。C# 是基于 C 语言和 Microsoft .NET 平台开发的编程语言, 它可以快速的编写各种基于 Microsoft .NET 平台的应用程序。其优势在于, 一是 C# 的现代化设计能够消除很多常见的 C++ 编程错误, 二是对版本的更新提供内在的支持降低了开发成本。

3.2 软件功能实现

软件功能以模块化实现, 各模块之间实现互相独立的功能, 定义统一的接口函数, 减少模块之间的耦合性, 某一个模块出现问题不影响其他模块的功能实现, 同时可以很好的扩展软件功能。测试结束后, 各模块分别打印测试报告^[11]。

以数字量遥测接收模块为例, 设计流程如图 4 所示。其中,

设计流程中的“读取配置表”指的是读取配置数据库文件来启动程序, 加载相应的配置信息, 使得测试功能运行在相应的程序中, 建立对应的“测试工程”, 当开始测试程序后, 界面能够实时显示对应的测试结果, 实现软件的通用化设计。具体实施步骤是: 软件开启前, 按照测试需求修改并完成配置数据库文件, 软件开启时, 读取预定义路径的配置数据库文件; 或者在软件运行后点击“装入脚本”按钮, 更新配置数据库文件。

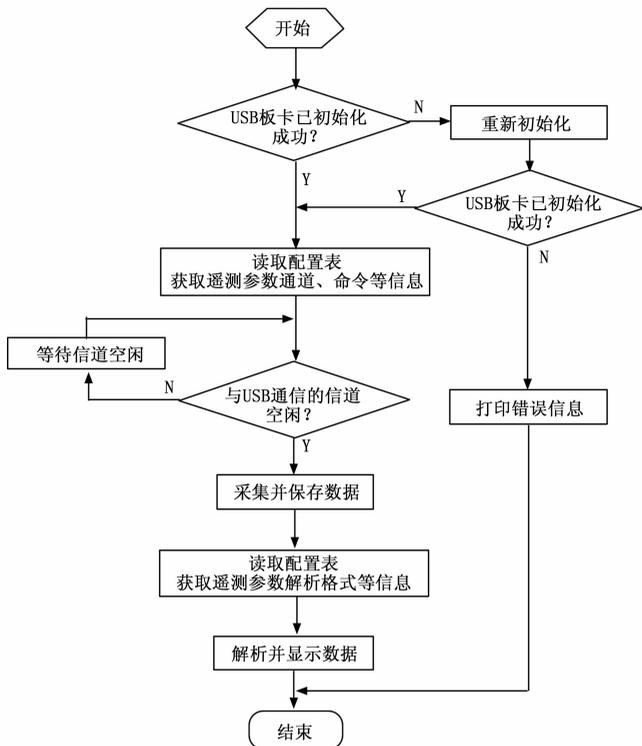


图 4 数字量遥测接收模块测试流程图

数字量遥测接收模块测试的流程, 详细阐述如下:

1) 板卡初始化: 在启动模块界面时, 软件判断 USB 板卡是否已初始化成功。如果是, 进入下一步; 否则, 重新初始化板卡。如果重新初始化板卡成功, 进入下一步; 否则, 打印错误消息, 退出该模块。

2) 读取配置表: 在启动此模块之前, 应确保已经按照测试需求, 完成数字量遥测接收的相关数据库配置, 包括通道数、遥测参数解析定义、参数个数和指令代码等。板卡初始化成功后, 软件读取相应的数据库配置文件, 加载数字量遥测接收的所有配置信息。

3) 采集数据: 启动采集数据的线程。首先, 判断 USB 信道是否空闲。如果是, 采集数据并本地存盘; 否则, 进入下一次循环, 等待信道空闲时再执行线程体。软件采集到的数据存入本地缓存, 等待解析数据的线程读取。

4) 解析数据: 启动解析数据的线程。首先, 判断本地缓存是否不为空。如果是, 把本地缓存数据按定义解析并显示; 否则, 进入下一次循环, 等待本地缓存不为空时再执行线程体。按照数据库配置文件, 软件解析数字量遥测, 把数据按照解析定义按位解析, 显示成特定含义或控制指示灯的亮与灭。

其他模块的设计流程和此流程类似, 故不再赘述。

3.3 软件界面

工作界面应满足以下要求: 整体界面友好、直观, 便于操

作和查看结果；标签、编辑框、按钮等整齐清楚；多个测试功能按模块分页面显示；界面上有必要的操作监控和文件路径；保存、解析、显示收到的数据可关联设置，可对测试数据进行管理，比对分析等^[12]。

经过总结，工作界面上应包括：

1) 模拟数据源发送，模拟多路工程遥测数据发送，数据以文本文件或二进制文件的形式输入，也可以在界面上手动编辑并输入；

2) 遥控指令发送，可通过界面新增、修改或删除指令，可选择不同的发送模式，如单次发送、周期发送或组合发送；

3) 模拟量遥测参数接收，遥测参数实时显示，曲线监控界面可配置，测试数据自动保存到文件，可以事后回放；

4) 遥控数据接收，设置存储路径，可保存数据，实时或事后数据比对，计算帧计数并做连续性判读、统计错误消息和误码率等信息；

5) 数字量遥测数据接收，数据解析并实时显示，存储路径界面可设置，可保存数据。把接收到的数据按照解析定义按位解析，显示成特定含义或控制指示灯的亮与灭。遥测解析实时或事后可选择，测试数据本地存盘。

3.4 软件测试

本软件已在多个卫星型号上应用实践。现摘取其中两个型号单机的应用实例进行软件测试，某型号功放级地面测试软件实例如图 5 所示，某型号 Ka 应答机地面测试软件实例如图 6 所示。测试结果表明，该软件功能完善，性能稳定，界面友好，能够实现不同的测试方案，具有一定的通用性和扩展性，满足了地面测试的各项需求。



图 5 卫星地面测试软件实例 1

4 结束语

本文设计的 USB 通用化地面测试软件，与以往的专用软件相比，其通用化的设计可以满足当前研制任务周期短、密度高、集成度高的需求，为地面测试提供了一种新的思路。本文的研究成果已在多个型号上得到验证，为后续的研究提供了有益的参考。

[12] Li G, Yao S. Research on mapping algorithm of UML sequence diagrams to object Petri nets [A]. GCIS'09. WRI Global Congress on Intelligent Systems, 2009 [C]. IEEE, 2009, 4: 285-289.

[13] Nematzadeh H, Deris S B, Maleki H, et al. Evaluating reliability of system sequence diagram using fuzzy Petri net [J]. Int' l Journal of Recent Trends in Enginerring, 2009, 1 (1): 142-147.

[14] Esparza J. Decidability and complexity of Petri net problems—an introduction [Z]. Lectures on Petri Nets I: Basic Models. Springer Berlin Heidelberg, 1998: 374-428.

[15] Knapp A, Wuttke J. Model checking of UML 2. 0 interactions [A]. International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems [C]. Springer Berlin Heidelberg, 2006: 42-51.

[16] Harel D, Kleinbort A, Maoz S. S2A: A compiler for multi-modal UML sequence diagrams [A]. International Conference on

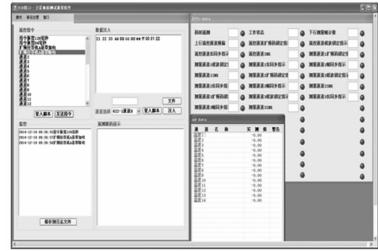


图 6 卫星地面测试软件实例 2

大、技术更新快的需求，是一个节省研制成本，确保测试任务高效完成的重大创新。本软件能够满足卫星数传分系统和测控分系统大部分单机地面测试的需求，并已在多个型号上得到验证。

参考文献：

[1] 马 骏. 通用虚拟测试系统设计方法研究 [D]. 西安：西北工业大学, 2006.

[2] 程 诗. 基于高频信号的无线电设备自动测试系统的研究与实现 [D]. 广州：华南理工大学, 2013.

[3] 刘宇宏, 陈 龙, 王亚鸣. 基于北斗的连续运行卫星定位综合服务平台设计及其应用 [J]. 上海航天, 2014, 31 (1): 37-43.

[4] 刘 雪, 陈宇峰. 三余度电液伺服阀静态特性测试系统研制 [J]. 上海航天, 2014, 31 (4): 64-68.

[5] 范 群. 产品通用化测试系统研究与实现 [J]. 计算机与数字工程, 2008, 36 (8): 54-57.

[6] 徐 明, 王金龙. 分离模块化航天器系统评估和优化设计研究 [J]. 上海航天, 2015, 32 (6): 8-16.

[7] 范风军, 杨 正, 祁士青. 基于 LabVIEW 的星用伽频标多通道时差数据自动采集系统 [J]. 上海航天, 2015, 32 (5): 69-72.

[8] 云 颖, 宋雷军. 基于 CAN 总线的星载软件测试系统设计 [J]. 上海航天, 2014, 31 (5): 65-68.

[9] 蔚保国, 李 隽, 易卿武. 卫星地面站通用化自动测试系统的研究与实现 [J]. 现代防御技术, 2006, 34 (5): 28-33.

[10] 刘 军, 邹 文, 张奎华, 等. 基于 CAN 总线的振动试验智能监控系统软件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (6): 136-138.

[11] 王立胜, 魏 然, 沈宗月, 等. 空间站信息系统仿真验证平台设计 [J]. 上海航天, 2014, 31 (1): 63-68.

[12] 姚洪奎. 数字示波器自动化测试软件系统设计与实现 [D]. 成都：电子科技大学, 2010.

[13] Boehm D. Fundamental Approaches to Software Engineering [C]. Springer Berlin Heidelberg, 2007: 121-124.

[14] Harel D, Maoz S. Assert and negate revisited: Modal semantics for UML sequence diagrams [J]. Software & Systems Modeling, 2008, 7 (2): 237-252.

[15] Broy M, Jonsson B, Katoen J P, et al. Model-Based testing of reactive systems [M]. Berlin: Heidelberg Springer - Verlag, 2005: 615-616.

[16] Lynch N A, Tuttle M R. An introduction to input/output automata [J]. CWI Quarterly, 1988, 2 (3): 219-246.

[17] 赵晓峰. 计算机联锁在 CBTC 系统中的两种集成方式 [J]. 铁道通信信号, 2012, 48 (11): 26-29.

[18] 凌祝军. CBTC 系统中的联锁技术研究 [J]. 铁道通信信号, 2009, 45 (9): 12-14.

[19] Jim Arlow, Ila Neustadt. UML 2.0 和统一过程 [M]. 方贵宾, 胡辉良, 译. 第二版. 北京：机械工业出版社, 2006.